

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE L'ENDOMMAGEMENT DES GRAINS D'UN SABLE SOUS HAUTE PRESSION

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF GRAIN BREAKAGE OF SAND HIGH PRESSURE

Seyf Eddine MESSIOUD¹, Mohammed KHOUAOUCI², Sadok FEIA¹, Radja ELANDALOUSSI³, Abdelali DADDA³

¹ *Laboratoire de Génie Civil (LRGC), Université de Biskra, Biskra, Algérie*

² *Faculté de Génie Civil, Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie*

³ *Université Paris-Est, Laboratoire Navier, CERMES, Ecole des Ponts ParisTech. Marne-la-Vallée, France*

RÉSUMÉ – Ce travail est consacré à l'étude de l'effet de l'endommagement des grains d'un sable sous fortes contraintes. Cette étude explore l'effet des paramètres tels que : la durée de chargement, la saturation de l'éprouvette et le mode de préparation de l'éprouvette. Les résultats montrent que le pourcentage des particules fines augmente légèrement avec : la durée de chargement «fluage», la saturation de l'éprouvette et l'éprouvette préparée par voie sèche.

ABSTRACT – This work is devoted to the study of the effect of the grain breakage of sand under high stresses. This study explores the effect of parameters such as: the loading time, the saturation of the specimen and the method of preparation of the specimen. The results show that the percentage of fine particles slightly increases with: loading time «creep», saturation of the specimen and the specimen prepared by dry method.

1. Introduction

L'écrasement des grains dans les matériaux granulaires a été étudiée par de nombreux chercheurs, qui ont réalisé des travaux expérimentaux, théoriques et numériques, sur différents matériaux et par différentes méthodes. On cite les travaux de Cil et Alshibli (2014), Dadda et al., (2015), Zheng et Tannant (2016).

Le temps semble être un facteur important dans le comportement des matériaux granulaires soumis à des fortes contraintes. A cet effet, plusieurs travaux se sont intéressés à cet aspect (Leung et al., 1996 ; Takei et al., 2001 ; McDowell et Khan 2003 ; Wang et al., 2011 ; Lade et al., 2010 ; Karimpour et Lade 2013). Leung et al., (1996) ont étudié le rôle de l'écrasement des grains dans le fluage d'un pieu dans le sable. Ils ont réalisé des essais œdométriques de fluage (temps d'application de la charge est long) sur un sable de nature siliceuse. Ils ont constaté que la quantité des fines augmente avec la durée de chargement. Takei et al., (2001) ont effectué des essais œdométriques sur quatre matériaux écrasables (barres de craie, barres de talc, perles de verre et particules de quartz). Dans cette étude ils ont montré que le comportement dépendant du temps sous la compression uni-axiale provient principalement d'un cycle répétitif de l'écrasement des grains, de réarrangement des particules et de redistribution des contraintes au niveau de contact inter-granulaire. McDowell et Khan (2003), ont effectué des essais œdométriques de fluage sur des échantillons de pâtes fragiles, et ils ont comparé les résultats avec ceux réalisés sur le sable à des niveaux de contrainte élevés. Ils ont constaté que les comportements de fluage du sable et des pâtes sont très similaires, et ont prouvé que la déformation de fluage est proportionnelle au logarithme du temps pour les deux matériaux. Wang et al., (2011) ont effectué des essais de compression avec

déformation uni-axiale pour l'étude du fluage sur le sable d'Ottawa, et ils ont établis une relation linéaire entre l'indice des vides et la quantité d'écrasement des grains. Lade et al., (2010) ont effectué des essais triaxiaux sur le sable corallien afin d'étudier les effets de fluage et de relaxation des contraintes. Dans ces essais, ils ont constaté une déformation qui augmente avec le temps. Karimpour et Lade (2013) ont effectué un essai de fluage pour une durée de deux mois sur le sable de la plage de Virginie à l'aide de l'appareil triaxial, et ils ont constaté qu'il n'y a pas de fin de fluage. Selon Karimpour et Lade (2013), le fluage est dû à une fatigue statique ou à une fracture retardée par laquelle les grains s'écrasent et provoquent un réarrangement de la structure des grains.

Ce travail représente une contribution à l'étude de l'effet de l'endommagement des grains des matériaux granulaires. Nous présentons une étude expérimentale afin d'explorer l'effet de certains paramètres tels que : la durée de chargement, la saturation de l'éprouvette et le mode de dépôt de sable dans l'éprouvette. Les essais réalisés, sur des éprouvettes sèches et saturées de sable carbonaté, ont été effectués dans des œdomètres à haute pression.

2. Étude antérieure

Le phénomène de l'endommagement des grains conduit à plusieurs changements du comportement des sols granulaires. Une explication des effets de l'endommagement des grains a été présentée par Dadda et al., (2015), qui ont effectué des essais œdométriques à haute pression sur deux sables (sable carbonaté et sable d'Hostun HN 34) à différents niveaux de chargement.

La Figure 1 montre une comparaison entre la relation contrainte-déformation pour sable carbonaté et de celui d'Hostun. Le changement de la pente des courbes contrainte-déformation correspond au début d'écrasement des grains. Ces résultats montrent que la déformation continue à évoluer en fonction du chargement.

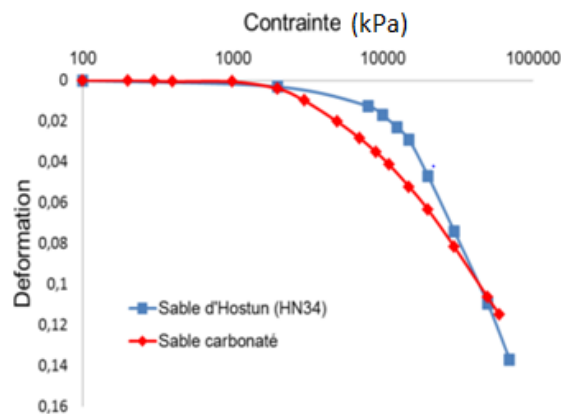


Figure 1. Courbes contrainte-déformation pour les deux sables (Dadda et al. 2015).

La Figure 2 présente l'évolution de la courbe granulométrique en fonction de la charge appliquée. Il est clair que la production des particules fines augmente avec l'augmentation de la charge.

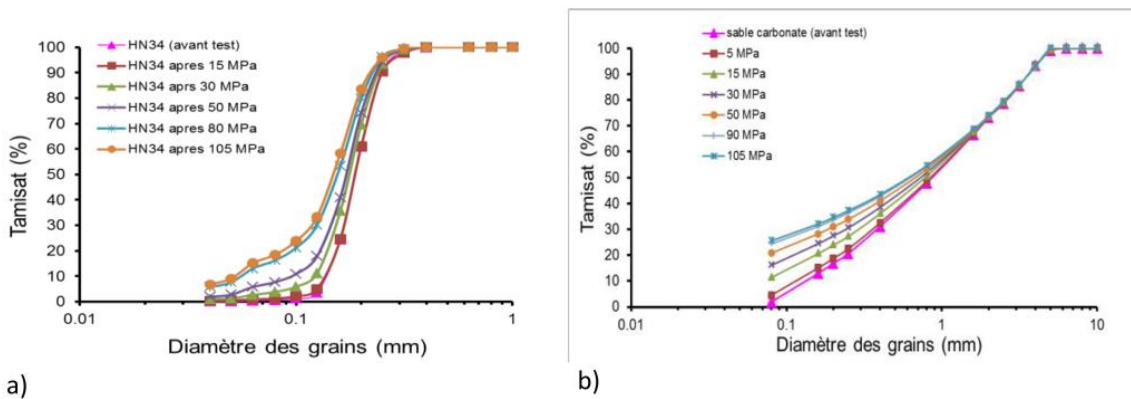


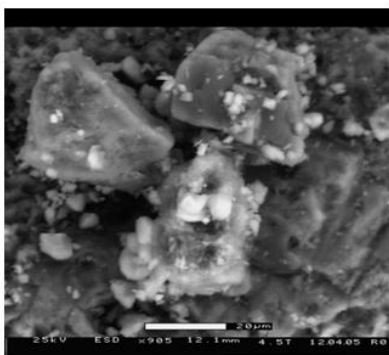
Figure 2. L'évolution de la courbe granulométrique en fonction de contrainte. a) Sable d'Hostun, b) Sable carbonaté (Dadda et al. 2015).

Dans cette étude la charge a été appliquée par palier, dans lesquels la durée de chaque palier est courte (10 minutes). Donc ces résultats montrent que l'endommagement des grains peut être influencé par le temps d'application de la charge. Pour vérifier l'effet du paramètre de temps sur l'endommagement des grains, une campagne d'essais œdométriques de fluage à haute pression a été effectuée sur un sable carbonaté.

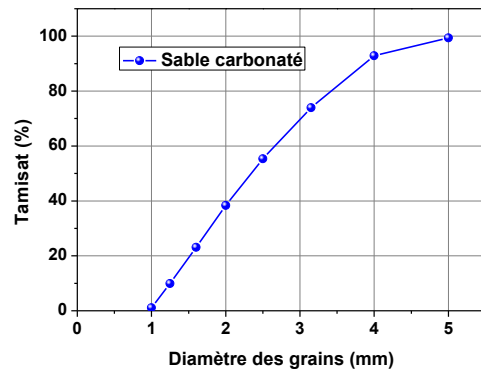
3. Matériau et Méthodes

3.1. Matériau

Le matériau utilisé dans cette étude est un sable carbonaté de taille des grains supérieure à 1 mm. Ce sable est dérivé principalement à partir de matériaux carbonatés tels que les coraux, les coquilles de mollusques, les algues, et dont la composition chimique contient 98 % de calcite. La Figure 3a présente une observation au microscope électronique à balayage (MEB) du sable carbonaté. La courbe granulométrique de ce sable est présentée sur la Figure 3b. Les propriétés du sable étudié sont présentées dans le Tableau 1.



(a)



(b)

Figure 3. (a) Vue au microscope électronique à balayage (MEB) du sable carbonaté. (b) Granulométrie initiale du sable étudié.

Tableau 1. Propriétés du sable étudié

| Matériau | $D_{50} (mm)$ | C_u | $\rho_s (g / cm^3)$ |
|-----------------|---------------|-------|---------------------|
| Sable carbonaté | 2,36 | 2,11 | 2,65 |

3.2. Dispositifs expérimentaux

Les essais sont réalisés à l'aide d'un œdomètre à double bras de levier. Cet œdomètre permet d'atteindre des pressions très élevées (110 MPa) (Figure 4a). Les essais sont effectués sur une cellule œdométrique de 50 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur. La déformation axiale est mesurée par un capteur de déplacement électronique placé en haut du bâti et relié avec un système d'acquisition (Figure 4b).

Des essais œdométriques de fluage à haute pression ont été effectués sur des éprouvettes sèches et saturées pour différentes durées d'application de la charge et pour deux modes de chargement ; dans le premier mode, l'application de la charge était en un seul palier, tandis que le deuxième mode est un chargement par plusieurs paliers. La valeur de contrainte appliquée dans chaque palier est de 2,5 MPa et la durée de chaque palier est de cinq minutes, sauf pour le dernier palier où la durée d'application de la charge a duré plusieurs heures.

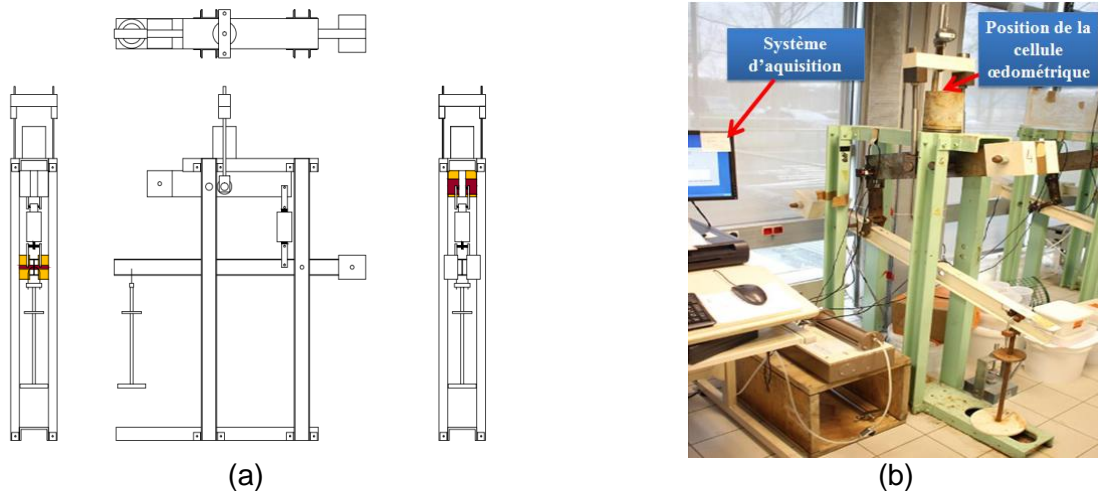


Figure 4. Œdomètre à haute pression. (a) Schéma d'ensemble (b) Photo du dispositif.

Selon Della et Feia (2017), la structure porale d'une éprouvette préparée avec une teneur en eau initiale présente des tailles des pores plus élevées que celle préparée à voie sèche. Afin d'explorer l'effet du mode de dépôt du sable dans l'éprouvette sur l'endommagement des grains, un essai œdométrique a été réalisé sur une éprouvette préparée à une teneur en eau initiale de 4 %.

Une analyse granulométrique de l'éprouvette est réalisée après chaque essai afin d'obtenir l'évolution de la granulométrie initiale du sable étudié. Les caractéristiques des essais réalisés sont données dans le Tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques des essais réalisés

| Essai | Mode de préparation de l'éprouvette | Etat de saturation de l'éprouvette | Contrainte appliquée (MPa) | Mode de chargement | Durée d'application de la charge (heure) |
|-------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|--|
| T1 | Voie sèche | Sèche | 15 | Chargement par plusieurs paliers | 94 |
| T2 | Voie sèche | Sèche | 15 | Chargement en un seul palier | 0,5 |
| T3 | Voie sèche | Sèche | 15 | Chargement par plusieurs paliers | 0,5 |
| T4 | Voie sèche | Saturée | 15 | Chargement en un seul palier | 0,5 |
| T5 | Voie sèche | Saturée | 15 | Chargement par plusieurs paliers | 0,5 |
| T6 | Voie humide $\omega = 4\%$ | Saturée | 15 | Chargement par plusieurs paliers | 0,5 |

4. Résultats expérimentaux

4.1. Mise en évidence de l'effet de fluage sur l'évolution de la courbe granulométrique

La durée de chargement est l'un des paramètres les plus importants pour étudier le phénomène de l'endommagement des grains d'un matériau granulaire soumis à des contraintes élevées. Un essai a été réalisé pour une longue durée (94 heures) sur une éprouvette sèche, sous une contrainte de 15 MPa. L'évolution du déplacement en fonction de logarithme du temps est présentée dans la Figure 5a. On distingue deux phases. Une première phase, lors des 15 premières heures de chargement, puis une seconde phase au-delà de 40 heures de chargement. Il est à noter que, lors de la deuxième phase, malgré la quasi stabilisation de la déformation, cette dernière continue à évoluer.

L'évolution de la pente de la courbe du temps-déplacement de l'essai T1 en fonction de logarithme du temps est présentée sur la Figure 5b. Une pente élevée est observée, qui diminue au cours du temps et tend vers un état stable. Cette évolution de la pente peut être expliquée par une production continue des particules fines et/ou des réarrangements de particules même après 20 heures d'application de la charge.

L'évolution de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final des essais T1 et T3 est présentée sur la Figure 5c. On observe, à l'état final, une production de particules inexistantes sur le matériau initial, cette production est légèrement plus importante pour l'essai T1. Les résultats montrent également que la production des particules inférieures à 1 mm est légèrement plus grande pour l'essai T1 (Figure 5d). Il est à noter que pour la suite de ces travaux les particules dont le diamètre est inférieur à 1mm seront définis comme particules fines.

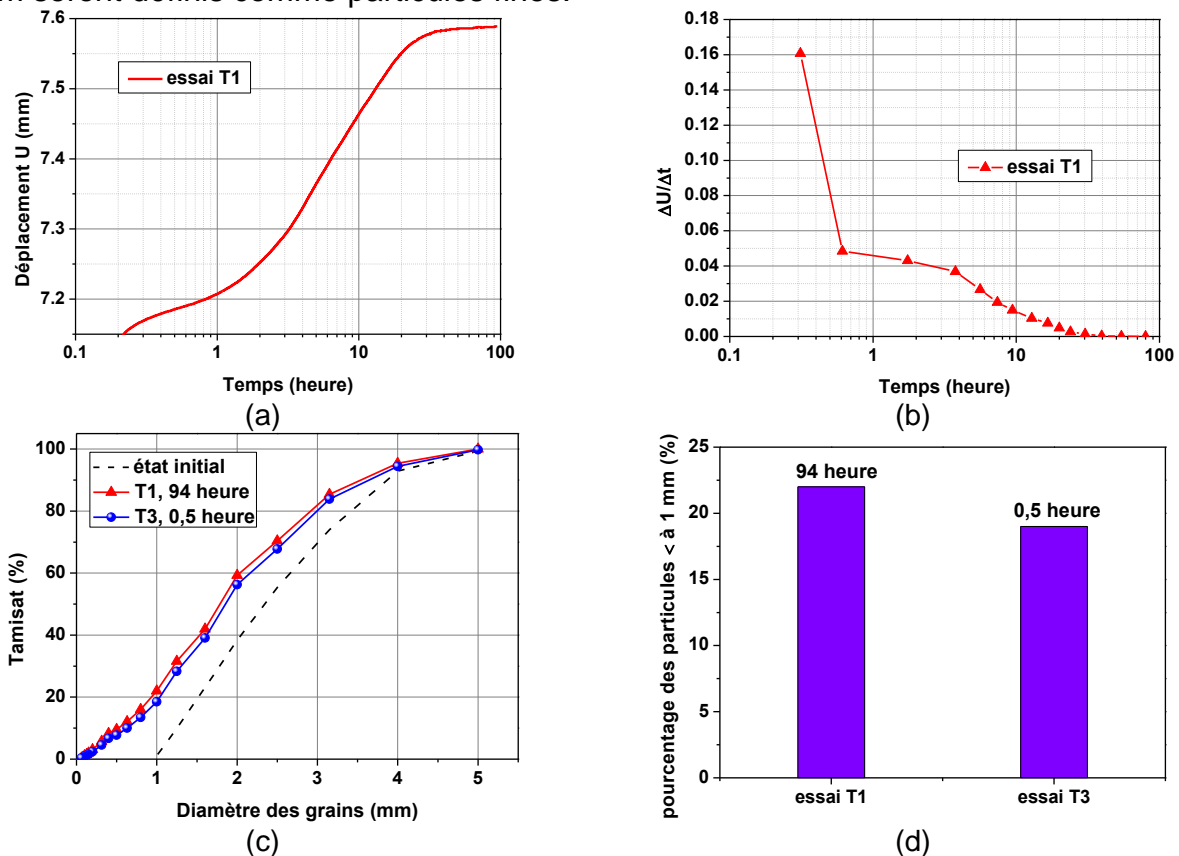


Figure 5. (a) Courbe temps-déplacement (essai T1). (b) Évolution de la pente du déplacement en fonction du temps (essai T1). (c) Évolution de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final de l'essai T1 et T3. (d) Comparaison des quantités de fines produites lors des essais T1 et T3 – effet de la durée de chargement.

4.2. Effet de saturation de l'éprouvette

Pour étudier l'influence de saturation de l'éprouvette, deux essais ont été effectués. L'essai T2 a été réalisé sur une éprouvette sèche et l'essai T4 est effectué sur une éprouvette saturée. La charge appliquée lors de ces essais est de 15 MPa, maintenue pendant 30 minutes. L'évolution du déplacement en fonction du temps de ces deux essais est présentée dans la Figure 6a. On constate un déplacement plus significatif dans l'éprouvette saturée par rapport à l'éprouvette sèche. Cela peut être interprété par une production des fines et/ou un important réarrangement des grains dans l'essai réalisé sur une éprouvette saturée.

La Figure 6b présente l'évolution de la pente de la courbe temps-déplacement des essais T2 et T4 en fonction du logarithme du temps. On remarque que la pente de l'éprouvette sèche se stabilise avant la stabilité de la pente de l'éprouvette saturée.

Les résultats de l'analyse granulométrique de ces deux essais sont présentés sur la Figure 6c. Ces résultats montrent que le taux d'écrasement des grains est légèrement plus grand pour l'éprouvette saturée. La production des particules inférieures à 1 mm est légèrement plus grande pour l'éprouvette saturée (Figure 6d).

Selon Ovalle (2013), l'eau génère une diminution de la résistance des particules et par conséquent le taux de rupture pourrait augmenter. Cela est dû à la pression interstitielle, notamment la capillarité à l'intérieur des microfissures, qui affecte les contraintes effectives et donc la contrainte nécessaire pour propager les fissures aux seins des grains.

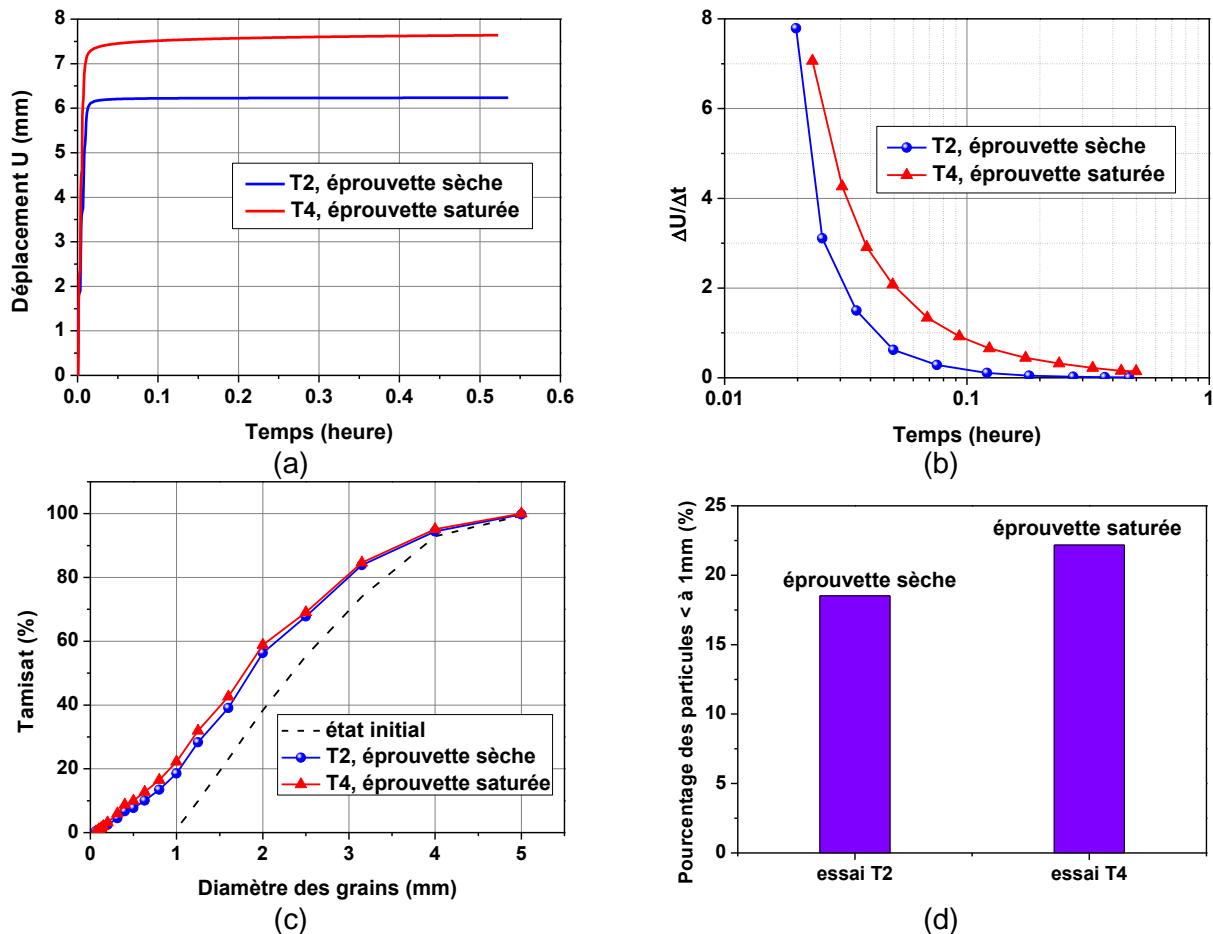


Figure 6. (a) Courbes temps-déplacement pour les essais T2 et T4. (b) Évolution de la pente du déplacement en fonction du temps pour les essais T2 et T4. (c) Évolution de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final de l'essai T2 et l'essai T4. (d) Comparaison des quantités de fines produites lors des essais T1 et T3. – effet de la saturation des éprouvettes.

4.3. Effet du mode de dépôt de sable dans l'éprouvette

Afin d'explorer l'effet de mode de préparation des éprouvettes, deux essais ont été réalisés. Le premier essai a été mené sur une éprouvette préparée par voie humide à une teneur en eau initiale de 4 % (essai T6) puis une saturation de l'éprouvette a été faite. Le second essai (T5) est réalisé sur une éprouvette préparée par voie sèche ensuite saturée avant l'application de la charge. Les résultats de variation du déplacement en fonction du temps sont présentés sur la Figure 7a. On constate que la déformation dans l'essai T6 est plus grande par rapport à l'essai T5.

L'évolution de la courbe granulométrique dans ces essais est présentée sur la Figure 7b. Les résultats montrent que la production des particules fines est légèrement plus grande pour l'éprouvette préparée par voie sèche (essai T5).

Ces résultats peuvent être expliqués par l'effet de la taille des pores. Della et Feia (2017) ont étudié l'effet du mode de dépôt de sable dans l'éprouvette sur la distribution de la taille d'accès aux pores. Ils ont utilisé deux méthodes de préparation de l'éprouvette, la première étant une pluviométrie sèche et la deuxième est un dépôt humide. Ils ont trouvé que l'éprouvette préparée par voie humide contient des pores plus grands. Ces tailles des pores élevées sont dues à la présence d'eau lors de la préparation de l'éprouvette.

L'augmentation de la taille des pores entraîne une diminution du nombre de contacts entre les grains. Cela pourrait conduire à la transformation de la charge vers les pores qui en résulte par un réarrangement des grains plus importants ce qui traduit la déformation la plus importante observée dans la Figure 7a.

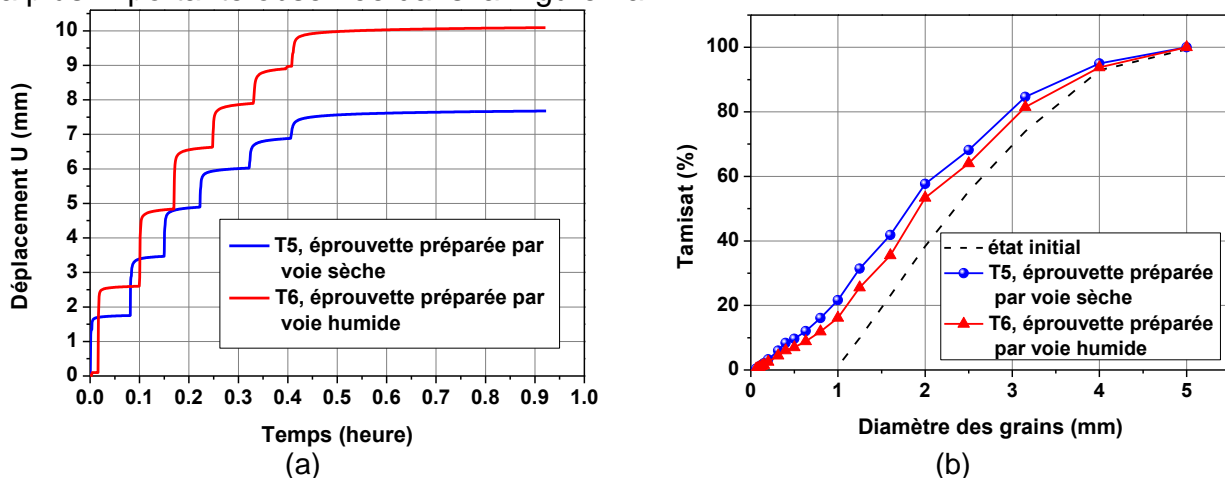


Figure 7. (a) Courbes temps-déplacement pour les essais T5 et T6. (b) Évolution de la courbe granulométrique entre l'état initial et l'état final de l'essai T5 et l'essai T6— effet du mode de dépôt.

5. Conclusions

Une étude expérimentale a été effectuée afin d'étudier l'effet de l'endommagement des grains des matériaux granulaires soumis à des fortes contraintes. Des essais œdométriques de fluage à haute pression ont été réalisés sur des éprouvettes sèches et saturées de sable carbonaté de taille des grains supérieurs à 1 mm. Ces essais sont suivis par des analyses granulométriques des éprouvettes après chargement. Les effets de différents paramètres tels que : la durée de chargement, la saturation de l'éprouvette et le mode de préparation de l'éprouvette ont été étudiés.

Les résultats expérimentaux montrent que la production des particules fines augmente avec la durée de chargement. Une production de fines un peu plus grande a été constatée pour des éprouvettes saturées comparée à celle enregistrée pour des éprouvettes sèches. L'étude de l'effet du mode de dépôt de sable dans l'éprouvette montre que la production des particules fines pour une éprouvette préparée à voie humide est plus faible par rapport à une éprouvette préparée à voie sèche. Cela peut être dû à l'augmentation de taille des pores, qui conduisent à une diminution de nombre de

contacts entre les grains et une diminution de concentration des contraintes inter-granulaires accompagnées par un réarrangement des grains plus important.

6. Références bibliographiques

- Dadda, A., S. Feia, S. Ghabzeloo, J. Sulem (2015). Fracturation des grains et l'évolution de la micro-structure d'un sable sous fortes contraintes. Congrès Algérien de Mécanique (CAM), El Oued 25-27 Octobre 2015.
- Della, N., & Feia, S. (2017). Experimental investigation on the effect of the mode of deposition on the pore-access size distribution of sand. *Geomechanics and Geoengineering*, 0(0), 1–9. <https://doi.org/10.1080/17486025.2017.1324177>
- Cil, M. B. & Alshibli, K. A. (2014). 3D evolution of sand fracture under 1D compression. *Geotechnique* 64, No. 5, 351–364 <http://dx.doi.org/10.1680/geot.13.P.119>
- Karimpour, H., Lade, P. V. (2013). Creep behavior in Virginia Beach sand. *Canadian Geotechnical Journal* (202), 1–61.
- Lade, P. V., Nam, J., & Liggio, C. D. (2010). Effects of Particle Crushing in Stress Drop-Relaxation Experiments on Crushed Coral Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(3), 500–509. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000212](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000212)
- Leung C F, Lee F H, Yet N S. The role of particle breakage in pile creep in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33 (6): 888–898.
- McDowell, G. R., & Khan, J. J. (2003). Creep of granular materials. *Granular Matter*, 5(3), 115–120. <https://doi.org/10.1007/s10035-003-0142-x>
- Ovalle, O.C. (2013). CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA RUPTURE DES GRAINS DANS LES MATERIAUX GRANULAIRES. Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Nantes, France
- Takei, M., Kusakabe, O. & Hayashi, T. (2001). Time-dependent behavior of crushable materials in one-dimensional compression tests. *Soils Found.* 41, No. 1, 97–121.
- Wang, Z., Wong, R. C. K., & Qiao, L. (2011). Investigation on relations between grain crushing amount and void ratio change of granular materials in one-dimensional compression and creep tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 3, 415–420. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2011.00415>
- Zheng.W., & Tannant, D. (2016). Frac sand crushing characteristics and morphology changes under high compressive stress and implications for sand pack permeability. *Canadian Geotechnical Journal*. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0045>